УДК 621.78.044.7

В.Н. ПУСТОВОЙТ, Ю.В. ДОЛГАЧЕВ

ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Методом электросопротивления получены данные о протекании мартенситного превращения в стали под действием магнитного поля, указывающие на возможность образования мартенсита напряжения (stress-assisted martensite) в температурном интервале $M_н$-$M_д$, в котором проявляется сверхпластичность аустенита. Эта возможность обусловлена магнитной гетерогенностью аустенита, наличием в парамагнитной матрице наноструктурного ансамбля ферромагнитно-упорядоченных кластеров, которые, воспринимая энергию внешнего магнитного поля через магнитострикционные напряжения, изменяют поля упругих сил в микрообъемах атомной решетки матрицы, что приводит к снижению энергии образования зародышевого центра критического размера.
***Ключевые слова:** магнитное поле, закалка, мартенсит напряжения.*

Введение. Работы, посвященные изучению особенностей протекания фазовых превращений в магнитном поле [1-5], показывают, что постоянное магнитное поле напряженностью более 300 кА/м оказывает каталитическое влияние на кинетику фазовых переходов, если исходная фаза неферромагнитна, а продукты превращения обладают ферромагнитными свойствами. Однако в этих работах научный подход к обсуждению наблюдаемых явлений не учитывает факт наличия сверхпластичности превращения и потери устойчивости решетки перед началом фазовой реакции.

Постановка задачи. Ставилась задача исследовать влияние магнитного поля на мартенситное превращение в стали методом электросопротивления и обсудить полученные результаты с учетом сверхпластичного состояния аустенита в процессе мартенситного превращения [6].

Методы исследований. Для проведения экспериментальных работ были осуществлены подбор и компоновка оборудования для создания магнитного поля, оснастки для нагревания, охлаждения и регистрации температуры и электросопротивления в процессе термической обработки магнитным полем.

Для исследования кинетики использовался метод электросопротивления, обладающий высокой чувствительностью по отношению к флуктуациям магнитного порядка. Аномалия электросопротивления при температуре образования ферромагнитной фазы позволяет легко оценить момент начала процесса и темп его развития.

Измерение электросопротивления было реализовано на базе комплекса специализированного оборудования кафедры "Физическое и прикладное материаловедение". Измерение и запись изменений электросопротивления выполнены потенциометрическим методом по схеме, показанной на рис. 1.

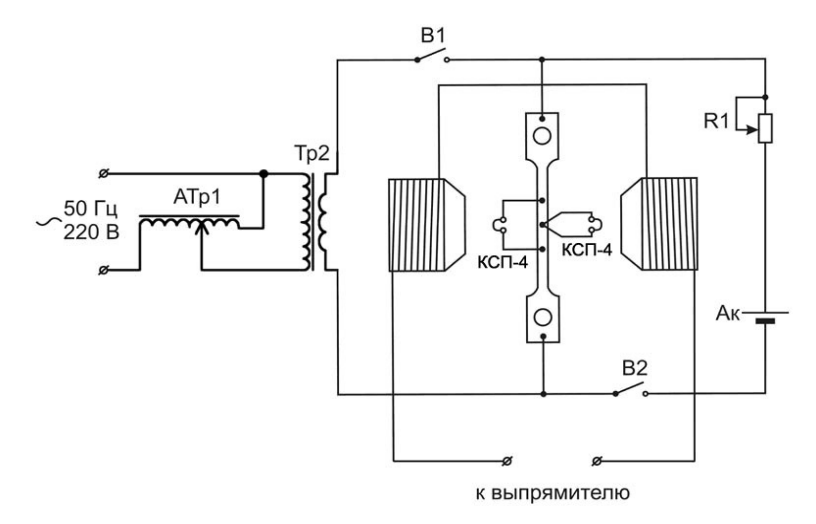


Рис.1. Принципиальная электрическая схема измерения и записи электросопротивления

Образец включался в электрическую цепь аккумулятора $А_К$ последовательно с прецизионным реостатом R1, которым устанавливался номинальный измерительный ток 10А, исключающий нагрев образца. Падение напряжения на базе 8 мм подавалось на вход потенциометра КСП-4 приваренными платиновыми электродами диаметром 0,3 мм. Измерение температуры осуществлялось платино-платинородиевой термопарой, приваренной в центре образца, на том же потенциометре.

Для исключения ошибок при записи температуры электроды термопары приваривались в центре образца в одну точку. Распространенный способ раздельной приварки электродов в данном случае не может быть использован, так как при пропускании через образец измерительного тока на термоэлектродах возникает ЭДС, изменяющая (уменьшающая или увеличивающая в зависимости от полярности соединения) сигнал термопары.

Включение цепи нагрева образца производится выключателем $В_1$. При этом происходит подключение образца к вторичной обмотке трансформатора Тр2. Измерительная схема во время нагрева разомкнута выключателем В2. После нагрева и выдержки выключение В1 и включение В2 переводит схему в режим измерения и записи электросопротивления. Внешнее магнитное поле напряженностью 0,8 МА/м создавалось электромагнитом ФЛ-1.

Характерные особенности кинетики фазовых переходов 1-го и 2-го рода можно отметить путем анализа температурной зависимости электросопротивления, а еще надежней (ввиду аномалий при температуре магнитного превращения) – при анализе зависимости *dR/dT(T)*. Для получения таких зависимостей проводилось численное дифференцирование данных записи температуры и электросопротивления и аппроксимация функции *dR/dT(T)* на ПЭВМ с использованием стандартных математических пакетов.

При проведении исследований применялись образцы из сталей Р6М5 и ХГ.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Из анализа временных зависимостей температуры и электросопротивления (рис.2) уже можно заме-

тить, что при охлаждении в магнитном поле начало аномалии электросопротивления наблюдается при более высоких температурах, чем у образца, охлаждаемого без поля. Температура $М_н$ для исследуемой стали Р6М5 (0,84% С, 4,1% Cr, 4,78% Mo, 6,35% W, 2,0% V) составляет 140 °С [7]. Это видно из рис.3, где показаны результаты машинного счёта, иллюстрирующие особенности развития мартенситного превращения под влиянием магнитного поля.

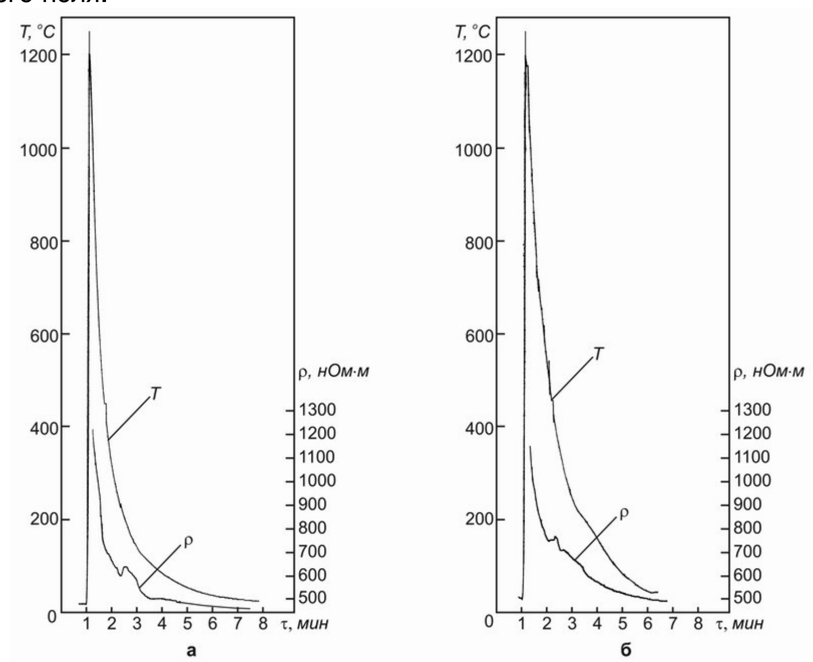


Рис.2. Временные зависимости температуры и электросопротивления для стали Р6М5: а – охлаждение без поля; б – охлаждение в магнитном поле 0,8 МА/м

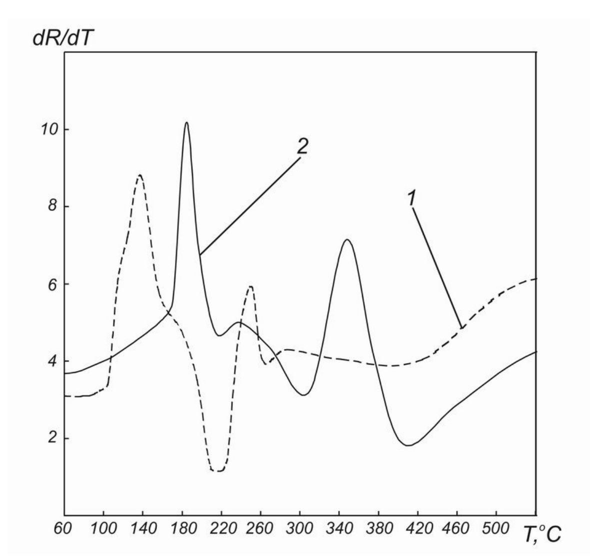


Рис.3. Температурная зависимость *dR*/*dT* для стали Р6М5: 1 – охлаждение без поля; 2 – охлаждение в магнитном поле напряженностью 0,8 МА/м

Общей особенностью рассматриваемых зависимостей является наличие аномалии электросопротивления (низкотемпературные пики) при температуре, соответствующей появлению ферромагнитной фазы в результате мартенситного превращения. При охлаждении в магнитном поле развитие мартенситного превращения начинается при более высокой температуре (~190°С), что не может найти объяснения с термодинамических позиций [1], предполагающих возможность существования ΔТ-эффекта (4-5°С) в магнитном поле 0,8 МА/м. Поэтому представляется очевидным, что при закалке в магнитном поле при температуре выше $М_н$ (в интервале $М_н$-$М_д$) образуется мартенсит напряжения в микрообъемах аустенита с ферромагнитным упорядочением. Эти микрообъемы, имеющие размеры ~1-2 нм [8], воспринимают энергию внешнего поля через магнитострикционные напряжения и, несмотря на то, что величина этих напряжений в полях ~1 МА/м не превышает ~10 МПа [1], в условиях сверхпластичного аустенита такие напряжения оказываются достаточными для инициирования сдвигового $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода.

Высокотемпературный пик на кривых *dR/dT(T)* обусловлен потерей устойчивости решетки аустенита перед мартенситным превращением. Температура, соответствующая этому пику, по-существу, и является границей, ниже которой аустенит становится сверхпластичным. Смещение пика в сторону высоких температур при охлаждении в магнитном поле также объясняется наличием ближнего порядка в расположении электронных спинов. Наложение магнитного поля при охлаждении способствует увеличению степени порядка за счет возникновения пространственной корреляции не только между соседними спинами, но и их ансамблями («роями»), в связи с чем увеличивается время релаксации флуктуации намагниченности, что эквивалентно повышению их мгновенной концентрации и термодинамической устойчивости. Характерно, что при образовании группы однонаправленных спинов в этой субмикрообласти создается анизотропное поле упругих искажений вследствие разницы в энергии намагничивания для различных кристаллографических направлений, что делает решетку аустенита неустойчивой при более высоких температурах. Размеры ферромагнитно-упорядоченных кластеров (1-2нм) соизмеримы с длиной электронных волн, и последние могут рассеиваться, что приводит к соответствующим изменениям на кривых *dR/dT.* Такие данные служат доказательством магнитной неоднородности матрицы и усиления степени её гетерогенности под действием магнитного поля.

Характерной особенностью образования мартенсита напряжения в температурном интервале сверхпластичности является наличие преимущественной ориентировки кристаллов в направлении вектора магнитного потока. Это особенно заметно для кристаллов мартенсита напряжения, образующихся первыми при температуре выше $М_н$. На рис.4 показаны результаты эксперимента, полученные при закалке образцов стали ХГ от температуры 1100°С в продольном магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м.

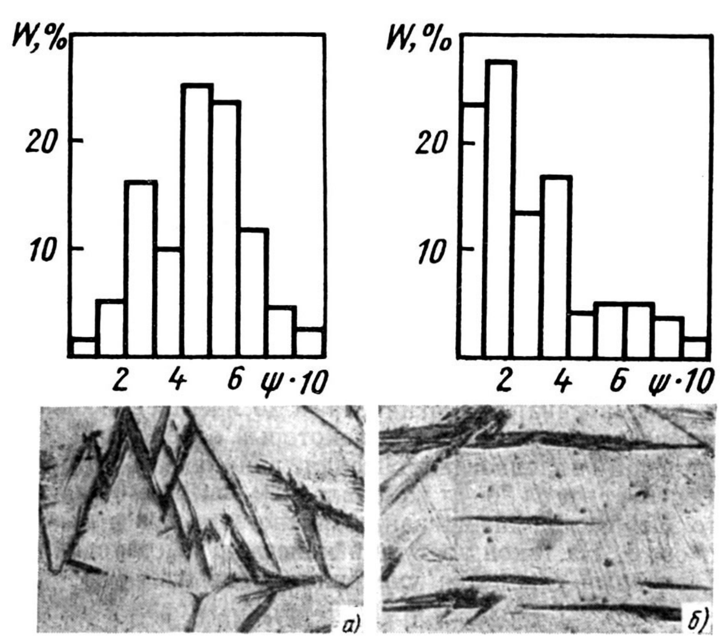


Рис.4. Фрагменты структуры (х300) и гистограммы распределения углов между направлениями вектора Н и длинной осью мартенситного кристалла после закалки без поля (а) и в магнитном поле (б) стали ХГ

Ориентированность кристаллов мартенсита напряжения можно объяснить следующим образом. Если рассматривать намагниченный до насыщения однодоменный мартенситный кристалл как некоторый однородный объем V, имеющий форму эллипсоида вращения, длинная ось которого при росте образует угол Θ с направлением внешнего магнитного поля, то энергию намагничивания можно записать в виде $W_м = I_sVH \cos\Theta$. На такой растущий кристалл действует крутящий момент, который стремится уменьшить угол Θ:

$$dW_м / d\Theta = - I_sVH \sin\Theta,$$

где $I_sV \sin\Theta$ - магнитный момент мартенситного кристалла.

В результате действия крутящего момента на краях каждого неблагоприятно ориентированного кристалла возникают чрезвычайно малые силы, не превышающие для самых крупных частиц десятка грамм. Тем не менее для ансамбля, состоящего из большого числа кристаллов, при одновременном вкладе энергии магнитострикционных деформаций и кристаллографической магнитной анизотропии процессы, связанные со стремлением кристалла к повороту под действием момента, могут оказать определенное влияние на развитие превращения в условиях сверхпластичного аустенита. С учетом явления неустойчивости решетки в момент $\gamma \to \alpha$ перехода, характерного для сверхпластичности превращения, решающее влияние могут оказать и весьма малые нагрузки.

Выводы: 1. Получены данные, указывающие на роль магнитной неоднородности аустенитной матрицы в процессе фазовых превращений. Воздействие магнитным полем при закалке приводит к усилению процессов своеобразного магнитного расслоения аустенита. При этом в температурном интервале $М_н$-$М_д$, когда аустенит становится сверхпластичным, существенно

облегчается образование мартенсита напряжения в микрообъемах аустенита с ферромагнитным упорядочением.

2. При росте кристаллов мартенсита напряжения в результате действия крутящего момента на краях каждого неблагоприятно ориентированного по отношению к вектору поля кристалла возникают силы, не превышающие для самых крупных частиц десятка граммов. Тем не менее для ансамбля, состоящего из большого числа кристаллов, при одновременном вкладе энергии магнитострикционных деформаций и кристаллографической магнитной анизотропии процессы, связанные со стремлением кристалла к повороту под действием крутящего момента, оказывают влияние на развитие превращения в условиях сверхпластичного аустенита.

Библиографический список

1. *Бернштейн М.Л.* Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М.Л.Бернштейн, В.Н.Пустовойт. – М.: Машиностроение, 1987. – 425 с.
2. *Корнилов Ю.А.* Влияние магнитного поля на аустенитно-мартенситное превращение в легированных инструментальных сталях / Ю.А.Корнилов, О.Ю.Сорочкина // Вестник ДГТУ. – 2004. – Т.4. – №1. – С.71-75.
3. *Filds R.* Effect of high magnetic fields on the martensite transformation / R.Filds, C.D.Gracham //Metallurgical Transactions. – 1976. – V.7. – N5. – P.539-544.
4. *Пустовойт В.Н.* Термодинамика, механизм и кинетика фазовых переходов в стали в условиях действия внешнего магнитного поля / В.Н.Пустовойт // Вестник ДГТУ.-2005.-Т.5.-№3.С.427-447.
5. *Садовский В.Д.* Влияние постоянного магнитного поля на диффузионный распад переохлажденного аустенита / В.Д.Садовский, Л.В.Смирнов, Е.П.Романов и др. // Физика металлов и металловедение. – 1978. –Т.46. –Вып.2. – С.54-55.
6. *Гуляев А.П.* Сверхпластичность стали / А.П.Гуляев. – М.: Металлургия. –1982. – 34 с.
7. *Попова Л.Е.* Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана / Л.Е.Попова, А.А.Попов. – М.: Металлургия. –1991. – С.411.
8. *Пустовойт В.Н.* Исследование механизма образования зародышей мартенсита при закалке в магнитном поле / В.Н.Пустовойт, Ю.В.Долгачёв // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №3. – С.4-7.

Материал поступил в редакцию 18.10.07.

V.N.PUSTOWOIT, Y.V.DOLGACHEV

FEATURES OF COURSE MARTENSITE TRANSFORMATION IN STEEL AT HARDENING IN THE CONSTANT MAGNETIC FIELD

Using the method of electroresistance obtains data about course martensite transformations in steel under action of the magnetic field, formations specifying an opportunity stress-assisted martensite in temperature interval M_S-M_F in which superplasticity is shown.

This opportunity is caused by magnetic heterogeneity austenite, presence in a paramagnetic matrix nanostrustural ensemble ferromagnetic ordering clusters which perceiving energy of an external magnetic field through magnetostrictive pressure, change fields of elastic forces in microvolumes of a nuclear lattice of a matrix, that causes to decrease in energy of formation germinal center of the critical size.

ПУСТОВОЙТ Виктор Николаевич (р.1940), заведующий кафедрой «Физическое и прикладное материаловедение» ДГТУ, профессор, доктор технических наук (1980). Окончил РИСХМ (1962) по специальности «Приборы точной механики».
Область научных интересов: гипернеравновесные фазовые переходы в металлах, обработка металлов в магнитном поле, поверхностное упрочнение сталей и сплавов с использованием концентрированных потоков энергии.
Имеет более 300 научных публикаций.

ДОЛГАЧЕВ Юрий Вячиславович (р.1983), аспирант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (ДГТУ). Окончил ДГТУ (2007) по специальности «Материаловедение в машиностроении».
Область научных интересов - термомагнитная обработка.
Имеет 2 публикации.